

交通運輸技術開発推進制度

研究成果報告書

(ダイジェスト版)

I o T を活用した実海域での
省エネ効果モニタリングシステム構築による
空気潤滑システムの実用省エネ効果向上の研究

令和6年3月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和6年3月
研究課題名	IoTを活用した実海域での省エネ効果モニタリングシステム構築による空気潤滑システムの実用省エネ効果向上の研究
研究代表者名	川島 英幹
研究期間	令和4年12月1日～令和6年3月29日
研究の目的	内航船を対象に、IoTを活用した実海域での省エネ効果のモニタリングシステムを構築し、得られたデータに基づき船体の状態、気象・海象条件に対応した空気吹出制御を行えるようにして、空気潤滑システムの実用省エネ効果を向上させることで、空気潤滑システムの社会実装を行い、内航海運の省エネ化と温室効果温暖化ガス排出の削減を目的としている。
研究成果の要旨	<p>内航船用標準型空気潤滑システムの検討のため、4,999DWT型タンカーを対象として、空気潤滑システム設計のための空気吹き出し部配置の計画方法の検討を行った。CFDにより空気潤滑状態の自航状態の計算を行い、省エネ効果の推定結果が、長尺平板模型の水槽試験結果を基にした方法と良く一致することを確認した。</p> <p>空気潤滑制御システムの開発のため、運航時に空気潤滑システムを制御した方が望ましいと考えられる状況を抽出した。また、それに対応した制御シナリオを作成し、制御アルゴリズムの検討を行った。そして制御アルゴリズムの良否を判断するための気泡挙動シミュレータの開発を行った。</p> <p>空気潤滑状態モニタリングシステムの開発のため、運航中の空気潤滑システム搭載船から得られる気象・海象条件、船体運動・状態等のモニタリングデータの解析方法と、実海域における省エネ効果を適切に評価できる手法の検討を行った。その結果を踏まえて、本年12月に竣工する499GT型貨物船に搭載する空気潤滑システムを対象に、実船用空気潤滑状態モニタリングシステムの基本設計を行った。</p>
知的財産権 取得状況	例) 特許出願 1件 著作権登録 0件
研究成果発表実績	論文発表：国内 4件、海外 1件 口頭発表：国内 5件、海外 2件 その他 :

II. 研究開発の目的と実施体制

(1) 研究開発の目的

2018年4月、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）は「船舶からのGHG排出量削減に関する初期戦略」を採択し、2050年までに国際海運からのGHG排出量を少なくとも50%削減し、今世紀中の可能な限り早期にGHG排出量をゼロとすることを目標として掲げている。内航船に関しても、「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」において「内航海運の低・脱炭素化に向けたロードマップ」が提示されており、内航船の排出する温室効果ガスの削減は喫緊の課題となっている。

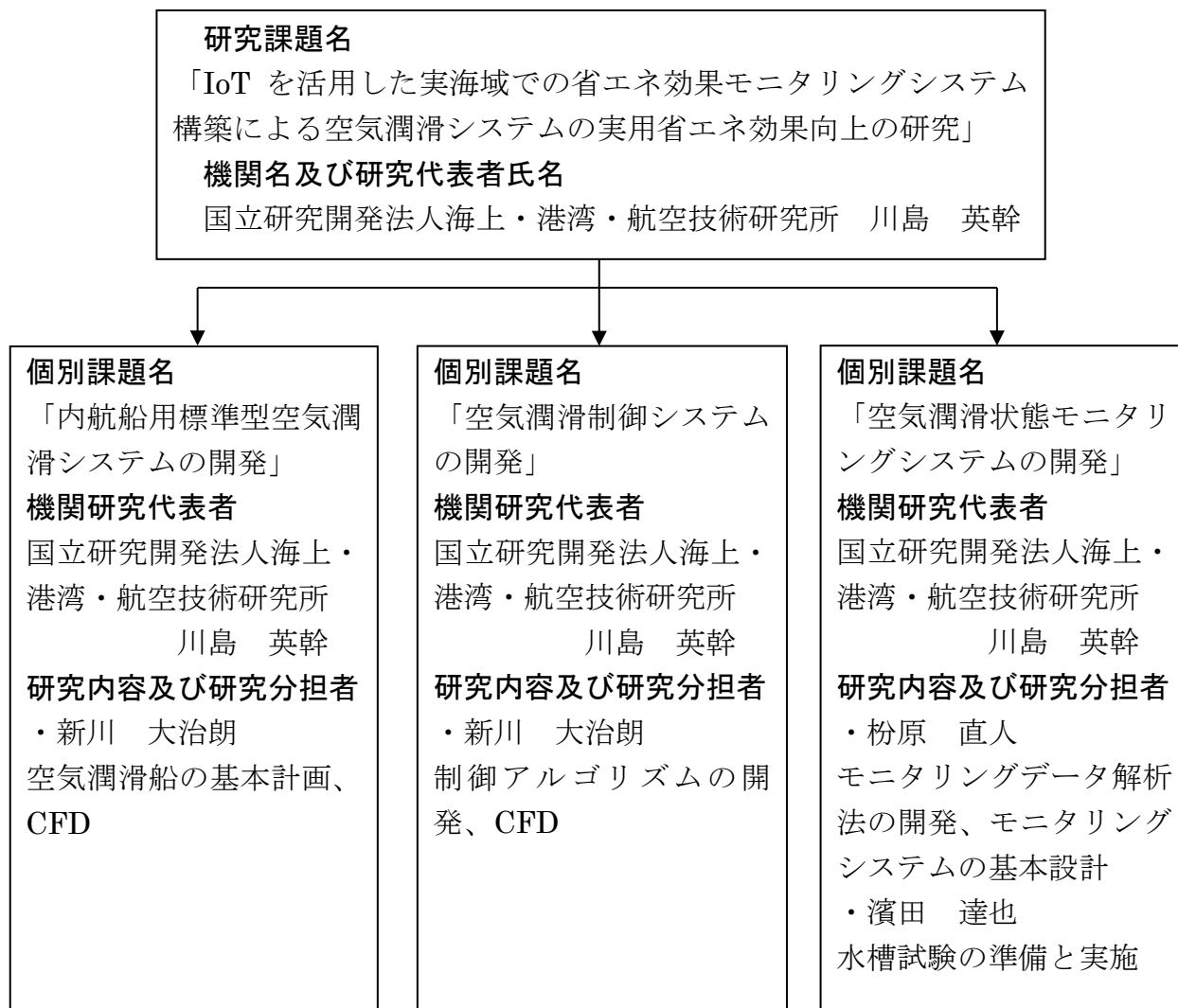
船舶の水との摩擦抵抗は船舶の全抵抗の60～70%を占めるため、摩擦抵抗を低減することは船舶の省エネ化を図る上で有効な手段である。空気潤滑法は現在のところ、船舶の摩擦抵抗を大幅に低減できる唯一実用化されている方法である。一方、船舶の省エネ技術は、造波抵抗の低減と推進効率の向上の2つの技術が中心となっており、本研究で対象とする内航船においても、これらの技術を基とした省エネデバイスが実用化されている。空気潤滑法は、これらの手法と独立して適用が可能のため、既に省エネデバイスが適用されている省エネ船にも追加で装備することができ、省エネ効果の積み増しを図ることができる。

内航船舶は船種毎に、199GT型、499GT型、749GT型、5,500k1（4,999DWT）タンカー等、船体規模が標準化されており、似通った主要目の船舶が多数就航している。そのため、各船型の内航船に対応した標準的な空気潤滑システムを開発すれば、空気潤滑システムのコストダウンが可能となり、その普及を進める事ができる。そうなれば、内航海運全体の温室効果ガス（GHG）排出を大幅に減少させることが可能である。一方、内航船は外航船に比べて船型が小さいため、気象・海象の影響を受けやすい。空気潤滑システムは波浪などの影響により船体が動揺、斜航すると、船底の気泡被覆状態が変化し、抵抗低減効果に影響を与える。そのため、気象・海象条件や船体の状態に合わせて空気吹出方法を制御することができれば、実運航における空気潤滑による温室効果ガス排出削減効果の向上が期待できる。しかし運航時に、気象・海象条件や船体の状態に合わせて空気潤滑システムの作動状態を制御することは、乗組員の数の少ない内航船においては困難なオペレーションであると考えられる。

IoTを利用して、空気潤滑システム搭載船のモニタリングデータを常時収集し、実海域における空気潤滑システムの制御方法を評価できれば、気象・海象条件や船体の状態に対応して適切な空気潤滑の制御方法に常時アップデート可能となる。これにより乗組員の数が少ない内航船においても、小さな乗組員の負荷で効率的に空気潤滑システムを運用し、実海域においても高い省エネ効果を保持できるようになる。これらのことを実現し、内航船へ空気潤滑システムを普及させ内航海運の温暖化ガスの排出量を削減することを目的に本研究を実施した。

(2) 研究実施体制

本研究は、単一機関「国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所」で実施した。また、技術移転先企業「ナカシマプロペラ株式会社」とは緊密に連携し、研究成果を商用化する実船用空気潤滑システムに反映して、社会実装を図る。研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



III. 研究開発の成果

1. 序論

船舶の水との摩擦抵抗は、船舶の全抵抗の60～70%を占めるため、摩擦抵抗を低減することは、船舶の省エネ化を図る上で有効な手段であり、空気潤滑法は、現在のところ、船舶の摩擦抵抗を大幅に低減できる方法で、唯一実用化されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ものである。海上技術安全技術研究所で実施した実船スケールの水槽試験では、気泡被覆部においては、100%近い摩擦抵抗低減を達成⁵⁾している。船舶の省エネ技術は、造波抵抗の低減と推進効率の向上が中心となっており、本研究で対象とする内航船においても、現状これら2種類の技術が省エネデバイスの中心となっている。空気潤滑は、これらの手法と独立して適用が可能のため、既に省エネデバイスが適用されている省エネ船にも追加で装備することができ、より一層省エネ化を図ることができる。

内航船舶は、船種毎に、199GT型、499GT型、749GT型、5,500k1(4,999DWT)タンカー等、船体規模が標準化されており、似通った主要目の船舶が多数就航している。そのため、各型の内航船に対応した標準的な空気潤滑システムを開発し、それを普及させることができれば、内航海運全体の温室効果ガス(GHG)排出を大幅に減少させることが期待できる。

一方、空気潤滑システムは、波浪などの影響により、船体が動揺すると、気泡による船体の被覆状態が影響を受けるため、海象と船体運動の条件により、最適な空気吹出状態が変化する。そのため、空気潤滑搭載船においては、海象と船体の運動条件に合わせて、空気吹出パラメータを変更することにより、実運航におけるGHG排出削減効果を向上させることができる。特に内航船は外航船に比べて小さい船型のため、海象や気象による影響を受けやすいので、空気潤滑システムを適用する際の、海象・船体状況に対応した制御の効用が大きくなる。しかし、運航時に海象条件や船体の運動状態に合わせて、空気潤滑システムの作動状態を制御することは、乗組員の数も少ない内航船においては、困難なオペレーションであると考えられる。

また空気潤滑船は就航例がまだ少ないため、海象・船体状況と省エネ効果の関係について明らかになっていない。本研究開発では、IoTを利用して空気潤滑システム搭載船のモニタリングデータを常時収集することで、空気潤滑制御システムを随時改良することができるようになり、実運航時における省エネ効果を継続的に改善することが可能となる。

本研究では、内航船の運航中の船体の状態、海象条件、船体運動の状況に合わせて、空気吹出のパラメータを自動的に変更する制御システムの開発を行う。また、IoTを活用して、運航中の空気潤滑システム搭載船から、海象条件、船体運動状態、喫水、主機出力、速力等の船舶の状態のモニタリングデータを、常時収集できるシステムと、収集したデータを用いて、実海域における空気吹出状況と省エネ効果の関係を解析することで、空気吹出制御方法を随時改良し、船側に提供できる体制の構築を目指した。

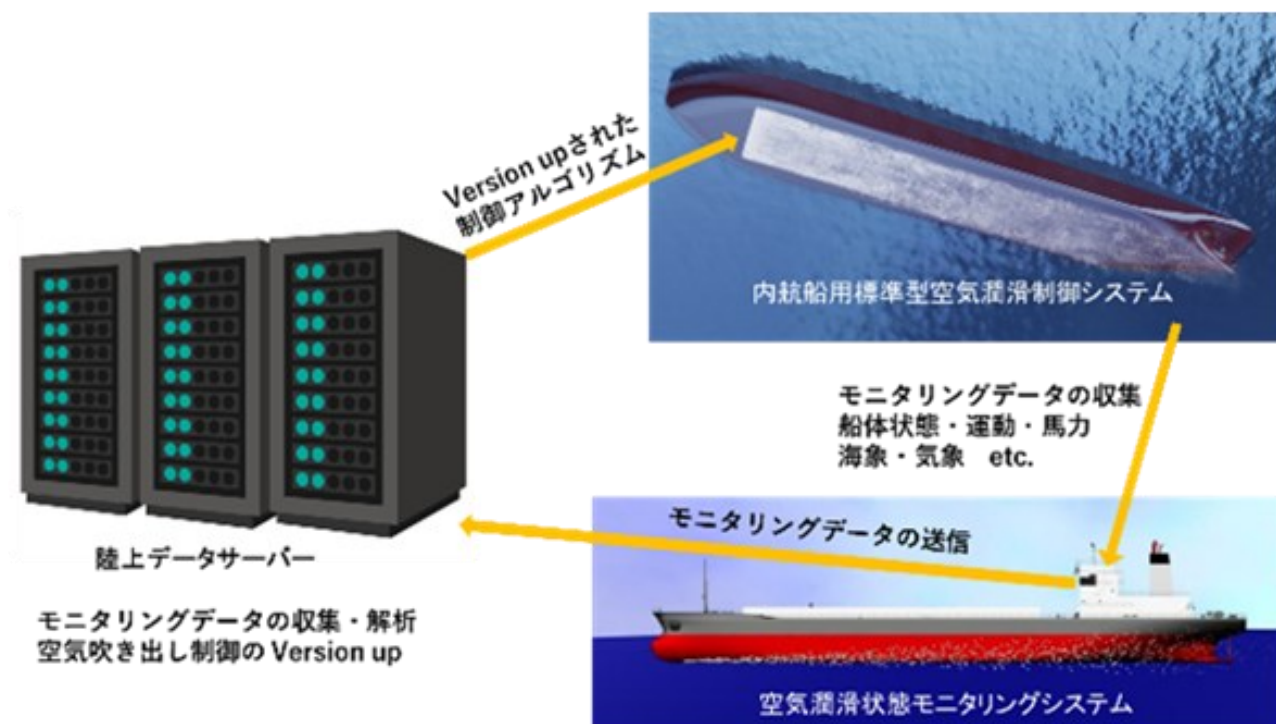


図1 IoTを活用した実海域での省エネ効果モニタリングシステム概念図

2. 内航船用標準型空気潤滑システムの開発

内航船舶は船種毎に、199GT型、499GT型、749GT型、5,500k1 (4,999DWT) タンカー等、船体規模が標準化されており、船体規模と船種が一致している内航船は、建造造船所や船主、海運会社が違っていても、その主要目は似通った物になっており、類似した主要目の船舶が多数就航している。一方、空気潤滑システムは、固定の流体力学的な構造物である船尾フィンやプロペラ前方ダクト等の省エネ機器と違い、ブロワーなどの送風機器、モーター等の電動機、インバータ、コンバータ等の制御機器、それらを制御する制御装置、制御のためのソフトウェアが必要となるが、これらの設計を個別の船舶に対応して行うことは、どうしても高コストになりがちである。

そのため、各船型の内航船に対応した標準的な空気潤滑システムを開発すれば、システム的设计コストや、ソフトウェアの開発コストが大幅に低減し、機器類も標準化・共通化できるため、空気潤滑システムの大幅なコストダウンが可能となり、その普及を進める事ができる。そうなれば、内航海運全体の温室効果ガス (GHG) 排出を大幅に減少させることが可能である。

そこで、空気潤滑システムの搭載が有望と考えられる内航船を対象に空気潤滑システムの基本計画を行うこととした。まず空気潤滑システムの概略検討を行った。さらにCFD (数値シミュレーション) により気泡被覆状態を推定し、空気吹出部配置の検討を行った。

2.1 内航船用空気潤滑システムの基本設計

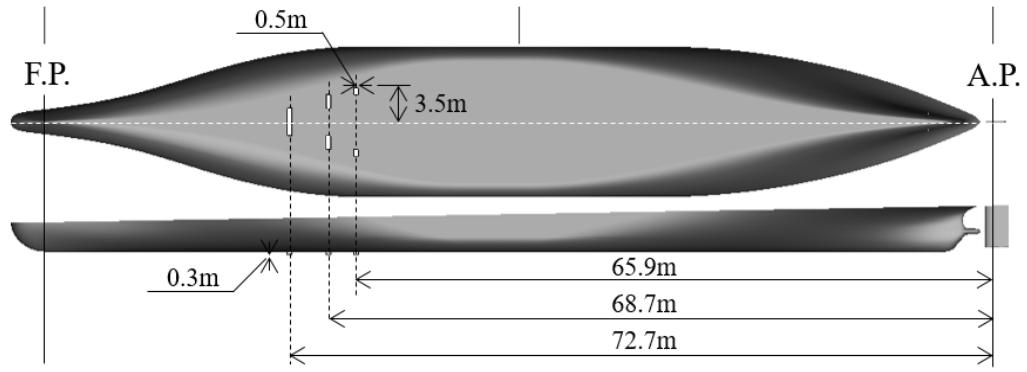
内航船用標準型空気潤滑システムの開発を念頭におき、内航船用空気潤滑システムの基本設計を行った。令和4年度に引き続き、比較的大型で隻数の多い内航船である5,500k1 (4,999DWT) 型タンカー (以後、4,999DWT型タンカーと記す。) を対象として基本計画を行った。船型は、当所で開発した4,999DWT型タンカーのものをを用いて検討した。表2.1に対象とした4,999DWT型タンカーの主要目を示す。

表 2.1 4,999DWT 型タンカー要目表

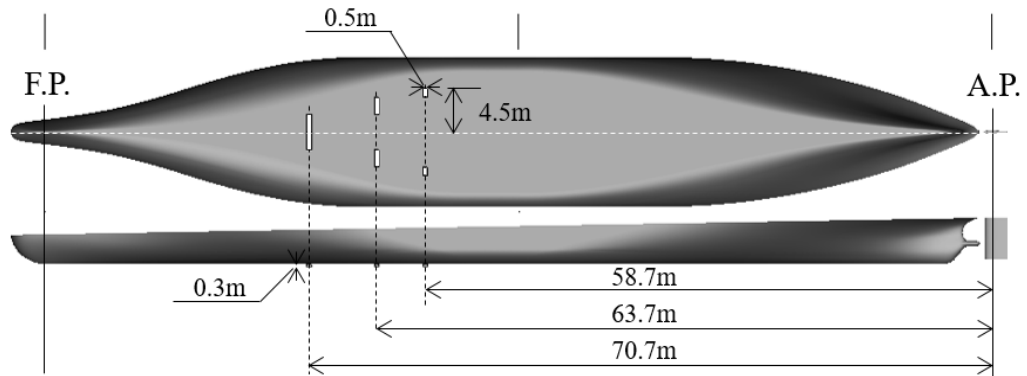
Condition		Full Load	Ballast
Length between Perpendiculars	Lpp [m]	98.0	98.0
Length at Load Water Line	Lwl [m]	100.5	100.5
Breadth	B [m]	15.4	15.4
Depth	D [m]	7.5	7.5
Draft (Aft)	da [m]	6.5	4.7
Draft (Midship)	dm [m]	6.5	3.9
Draft (Fore)	df [m]	6.5	3.0
Wetted surface Area with Keel	S [m ²]	2197.8	-
Wetted surface Area with Appendage	S [m ²]	2274.1	1680.5
Displacement with Keel	▽ [m ³]	6867.9	-
Displacement with Appendage	▽ [m ³]	6870.3	3778.1
Longitudinal Center of Buoyancy (Aftward, +)	LCB [% Lpp]	-0.733	0.306
Block Coefficient	Cb [-]	0.7002	0.6438
Midship Coefficient	Cm [-]	0.9905	0.9839
Prismatic Coefficient	Cp [-]	0.7069	0.6543

空気潤滑システムを搭載した 4,999DWT 型タンカーの基本設計を行うため、また気象・海象や船体条件に応じた空気吹出パターンを制御することで実運航における空気吹出による省エネ効果向上を行うため、複数の空気吹出パターンにおいて空気潤滑システムの気泡を考慮した船舶の自航状態の数値シミュレーション（CFD）を実施した。

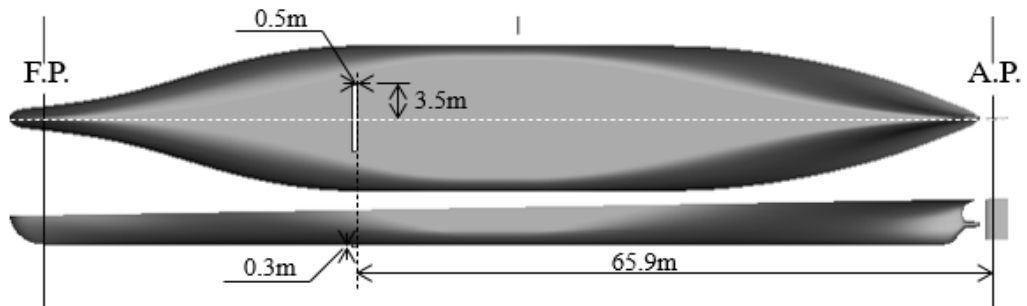
4,999DWT 型タンカーを対象に複数の吹出部配置の条件において、シミュレーションを実施することで検討を行った。空気吹出部の配置を図 2.1 に示す。パターン 1 は吹出部の幅が 7.0m で船首尾方向に 3 段に配置した。パターン 2 は吹出部の全体幅が 9.0m で船首尾方向に 3 段に配置した。パターン 3, パターン 4 はそれぞれ全体の吹出部の幅が 7.0m, 5.25m で横一列に配置した。



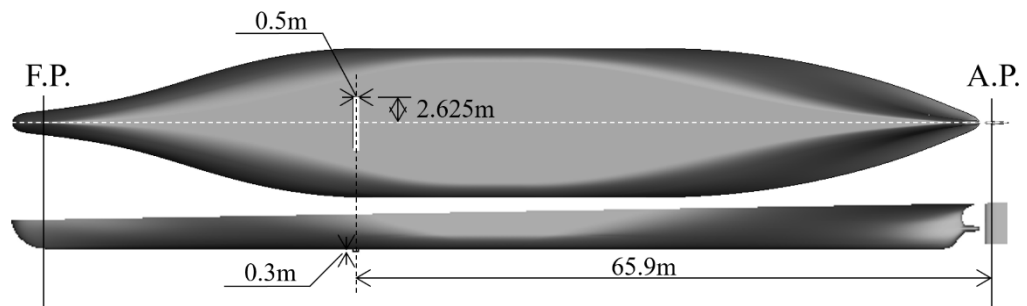
(a) パターン 1



(b) パターン 2



(c) パターン 3



(d) パターン 4

図 2.1 空気吹出部配置

自航状態のシミュレーション結果を表 2.2、表 2.3 に、自航状態の抵抗係数を表 2.4 に示す。気泡が

ある条件下での伝達出力 P_D は、気泡のない条件下での伝達出力に比べて 5.4~6.1% 小さくなる。

表 2.2 自航状態のシミュレーションの結果 (その 1)

Air injection	n [rps]	T [N]	Q [Nm]	J [-]	K_T [-]	$10K_{Q,ow}$ [-]	$10K_Q$ [-]	η_o [-]
Without	3.319	112,416	46,141	0.522	0.097	0.130	0.125	0.624
パターン 1	3.340	99,079	43,078	0.548	0.085	0.119	0.115	0.623
パターン 2	3.330	100,790	43,507	0.544	0.087	0.121	0.117	0.624
パターン 3	3.332	100,169	43,234	0.545	0.086	0.120	0.116	0.623
パターン 4	3.338	100,137	43,104	0.546	0.086	0.120	0.116	0.623

表 2.3 自航状態のシミュレーションの結果 (その 2)

Air injection	η_R [-]	t [-]	w [-]	η_H [-]	η_D [-]	P_E [kW]	P_D [kW]	$P_D/P_{D,W/OA}$ [%]
Without	1.038	0.149	0.256	1.145	0.742	714	962	100.0
パターン 1	1.030	0.145	0.215	1.089	0.699	632	904	93.9
パターン 2	1.029	0.144	0.223	1.102	0.707	644	910	94.6
パターン 3	1.032	0.148	0.221	1.093	0.703	637	905	94.1
パターン 4	1.036	0.150	0.219	1.088	0.702	635	904	93.9

表 2.4 自航状態の抵抗係数

Air injection	C_F [-] $\times 10^{-3}$	C_{VP} [-] $\times 10^{-4}$	C_w [-] $\times 10^{-3}$	C_T [-] $\times 10^{-3}$
Without	1.632	4.897	3.320	2.454
パターン 1	1.453	3.770		2.162
パターン 2	1.486	3.798		2.198
パターン 3	1.471	3.827		2.186
パターン 4	1.464	3.879		2.184

図 2.2 に自航状態の船体表面の局所摩擦抵抗係数を示す。

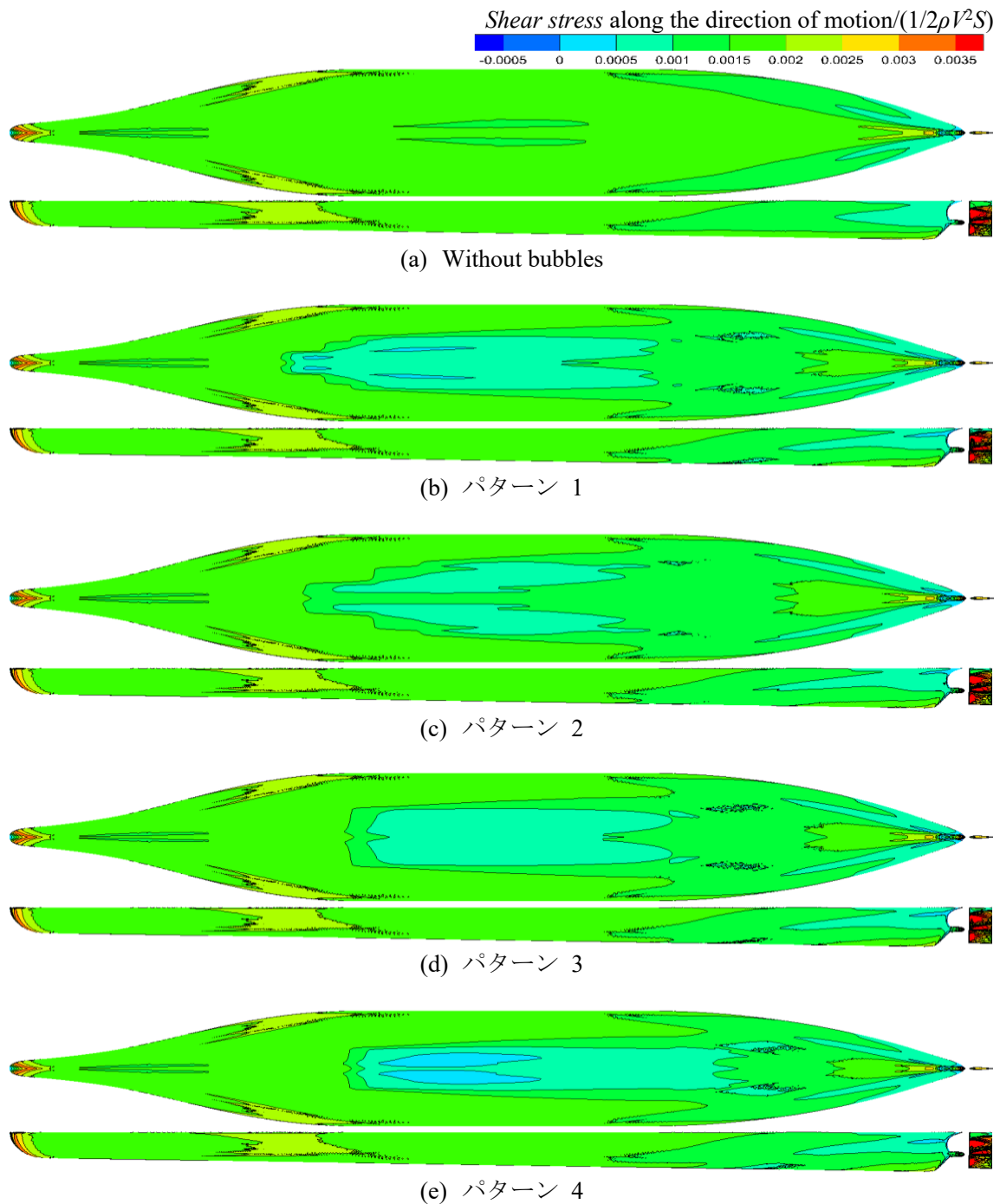


図 2.2 自航状態の船体表面の局所摩擦抵抗係数

空気潤滑システムを搭載した 4,999DWT 型タンカーの基本設計を行うため、また気象・海象や船体条件に応じた空気吹出パターンを制御することで実運航における空気吹出による省エネ効果向上を行うため、複数の空気吹出パターンにおいて空気潤滑システムの気泡を考慮した船舶の抵抗状態および自航状態のシミュレーションを実施した。得られた結果を以下に示す。

- ・気泡なし条件と比較して、気泡あり条件では、推進効率 η_D が 4.7~5.8% 小さく、伝達出力 P_D が 5.4~6.1% 小さい。

このシミュレーションでは、パターン 1 と、パターン 4 が伝達出力 P_D が最も小さい。しかし、パターン 4 はプロペラ面のボイド率が大きいいため、今回設定した流量ではパターン 1 の吹出パターンが最も優れているといえる。ただし、吹出空気量が異なると最適な吹出幅は異なるため、追加のシミュレーションが必要である。

ユレーションの実施やモニタリングにより最適な制御が可能なデータの蓄積が必要である。

2.2 実船用空気潤滑システムの構成

内航船用空気潤滑システムに必要なシステムと機器の構成について検討した。船体の状態や運動に合わせた制御を可能とする空気潤滑システムには、ブロワーなどの送風機器、モーター等の電動機、インバータ等の制御機器、各吹出部への流量調整弁が必要となる。必要な構成機器のリストを表 2.5 に、機器の系統図を図 2.3 に示す。

表 2.5 空気潤滑システムの構成機器

空気潤滑システム構成機器	
1	ブロワー
2	ブロワー駆動モーター
3	インバーター
4	空気冷却器
5	流量調整弁
6	船底弁

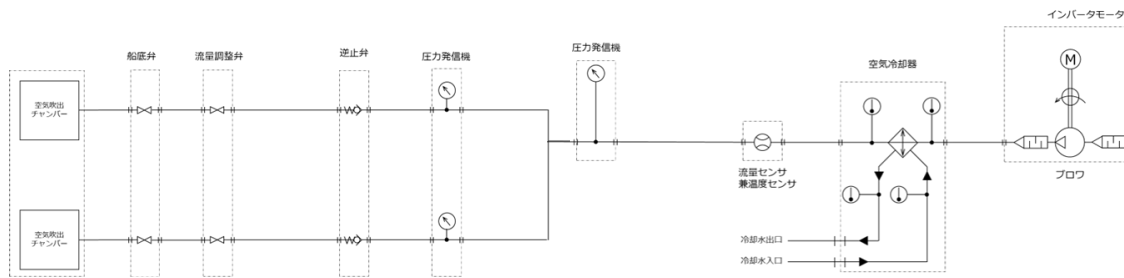


図 2.3 空気潤滑システムの構成機器の系統図

3. 空気潤滑制御システムの開発

空気潤滑は、気象・海象が原因となる船体運動によりその抵抗低減効果が影響を受ける。また満載、空荷等の積載状態、船速の変化により、最適な空気吹き出し状態は変化する。

そのため、空気潤滑船の運航時に、船体の状態、海象条件、船体運動の状況に合わせて、空気潤滑システムを制御することにより、実運航時の空気潤滑システムの省エネ効果を向上させるため、空気潤滑の吹き出し制御システムの開発を行った

そこで、まず空気潤滑を制御すべき状況を抽出し、その状況に応じた空気潤滑システムの制御シナリオを作成し、制御アルゴリズムの検討を行った。また CFD による空気潤滑状態のシミュレーションとポテンシャル計算ベースの気泡挙動シミュレータの開発を行い、制御アルゴリズムを評価した。

3.1 制御すべき状況の抽出 制御状況の抽出・シナリオについて

運航中の船体の状態、海象条件、船体運動の状況に合せた空気吹出制御を行うための制御アルゴリズムの検討を行う。そのために、運航時に空気潤滑システムの制御をした方が望ましいと考えられる状況を抽出し、それに対応した制御シナリオを作成した。

まず制御すべき状況の抽出を行った。船体の姿勢によって制御した方がよいと考えられる状況として、ヒールしている状態とトリムしている状態が考えられる。潮流の影響によって斜航している状態、波浪によって船体がローリング・ピッチングしている状態が考えられる。また、波のオービタルモーションが船底を流れる気泡に影響を与えている状況が考えられる。表 3.1 に状況に応じて制御した方が望ましいと考えられる状況を示す。

表 3.1 空気潤滑システムを制御すべき状況

制御すべき状況
① 船速の変化
<input checked="" type="checkbox"/> ② 喫水の変化
③ トリムの変化
④ ヒール
⑤ 斜航（潮流の影響）
⑥ 旋回
⑦ 船体動揺（ローリング）
⑧ 船体動揺（ピッチング）
⑨ 波浪中

3.2 制御シナリオ及びアルゴリズムの検討

抽出された制御すべき状況に対応した制御シナリオ及びアルゴリズムを検討した。検討結果を以下に記す。

① 船速の変化

【状況】

船速の変化により、最適な空気吹出量が変化する。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

長尺平板模型試験結果より、速度に応じた最適な相当気膜厚さを求め、船底の気泡が最適な相当気膜厚さになるように船底に投入する空気量を制御する。

【必要なセンサー】

- ・ 対水船速計
- ・ 喫水計

② 喫水の変化

【状況】

積み付けの状態の変化により、喫水が変化する。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

喫水の変化により、船底での気泡量（体積）が変化するため、ブロワーで圧送する空気の量を制御する。

船型によっては、喫水の変化により、吹出箇所を変更した方が、省エネ効果が增大する場合がある。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計

③トリムの変化

【状況】

船尾トリムの場合、船首側の吹出口の喫水が浅く少ないエネルギーで船底に空気を供給することができる。

船体表面に沿って流れる気泡は浮力と船底の傾斜によって、トリムがない状態に比べ気泡の主流方向の速度が遅くなり、吹出口から幅方向に広がりやすく気泡の船側からの漏出量が多くなる可能性がある。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

船首尾の喫水計からトリムを算出

トリム角度に対応した吹き出し方法に変更

(例えば、船側からの漏出を防止し、船底全体を気泡で覆えるように、船側からの流量を減少させ、船体中央に近い吹出口からの流量を増加させる)

(吹き出し方法は、気泡挙動シミュレータで事前に検討する)

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計 (船首尾)

④ヒール

【状況】

ヒールしている状況では、気泡が浮力により喫水の浅い船側へ気泡が流れ、そのまま船側から漏出することが考えられる。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

喫水が浅い方の吹出口からの空気の流量を減らし、喫水が深い方の吹出口から空気の流量を小さくする制御が考えられる。

船がヒールしている状況は運航している状態が多くはないため (ヒールするのは、主に旋回している状況である。積み付けなどで常にヒールしていることがないとはいえないが、意図的にヒールさせるとは考えられない。) ヒールがある条件を超えない限りは制御を行わず、ヒールがある閾値を超えた条件において、空気潤滑システムの停止を行う。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計
- ・横傾斜計 (ジャイロ)

⑤斜航 (潮流の影響)

【状況】

斜航している状況では、下流側の船側から気泡が流れ出ることにより、摩擦抵抗低減に作用する気泡が減少する。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

舵角、針路から斜航角を検知する。

斜航していることを検知したのち、上流側の吹出口からの流量を大きくし、下流側の流量を小さくす

る制御を実施する。このような斜航角に対応した、空気吹出箇所の吹出量の制御を行う。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計
- ・GPS（進路）
- ・舵角

⑥旋回

【状況】

斜航時と同様に旋回時は、気泡の被覆状況が変化するため、下流側の船側から気泡が流れ出ることにより、船底に吹き出した空気によって摩擦抵抗低減に作用する気泡が減少する。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

舵角から旋回していることを検知する。

斜航していることを検知したのち、上流側の吹出口からの流量を大きくし、下流側の流量を小さくする制御を実施する。このような斜航角に対応した、空気吹出箇所の吹出量の制御を行う。また、ある一定の舵角がある時間を超えた場合には、空気の吹出を停止する。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計
- ・GPS（進路）
- ・舵角

⑦船体動揺（ローリング）

【状況】

船体がローリングしている状況では、喫水の浅い側へ気泡が向かうため、船側から気泡が離れる量が増加する。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

傾斜計の値からローリング角を検知

最大値を時間平均

両舷の船側に近い吹出口からの空気の流量を減らす制御を行うことで、船側から船底を離れる気泡の量を低減させる。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計
- ・横傾斜計（ジャイロ）

⑧船体動揺（ピッチング）

【状況】

船体がピッチングしている状況では、船底気泡分布が船幅方向に脈動するような変化をする。沈みこむときに船側に逃げ、浮かぶ時に船体中央に集まる。沈み込んだ際に、船側から気泡が離れることになる。

【制御シナリオ及びアルゴリズム】

傾斜計の値からピッチング角を検知

最大値を時間平均

ピッチング角の最大値の時間平均に基づき、吹出幅を変更

船側から船底を離れる気泡の量を低減させるため、船側に近い吹出口からの空気の流量を減らす制御を行う。

【必要なセンサー】

- ・対水船速計
- ・喫水計
- ・縦傾斜計（ジャイロ）

3.3 気泡挙動シミュレータによる空気潤滑制御アルゴリズムの検討

3.3.1 気泡挙動シミュレータについて

空気潤滑システムの制御アルゴリズムを検証するためのツールとして、気泡挙動シミュレータを開発した。NS 方程式を解く RANS 法に、気泡モデルを入れてシミュレーションを行う方法は、動揺時の空気吹き出し制御等、動的状態のシミュレーションを行い制御アルゴリズムの検証を行うには、計算負荷が大きすぎるため、実用に適さない。そこで計算負荷を軽減させるため、Larrarte らの手法¹⁶⁾を基に、ポテンシャル流場を用いて単一気泡の運動方程式を解くことでポテンシャル流場における気泡追跡線を計算する方法で船体周りの気泡の挙動をシミュレーションする方法を開発した。

3.3.2 制御シナリオに対する制御結果の評価

4,999DWT 型タンカーを対象に吹出制御の評価を実施した。船体にロール運動が発生した際の制御シナリオを検討するため、本対象船を強制動揺させた場合の評価を行った。強制動揺時の横揺れ角は 6deg に設定した。

採用した制御アルゴリズムは、空気吹き出し部の幅を狭めることで、船側からの気泡漏出量を低減させるものである。図 3.1 は制御なしの気泡被覆率を示し、図 3.2 は制御ありの気泡被覆率を示す。空気吹き出し幅を狭める制御により、船体側面からの気泡漏れが減少した。空気吹き出し幅を狭める制御アルゴリズムは、船体の横揺れ運動を引き起こす海況において有効であることが確認された。

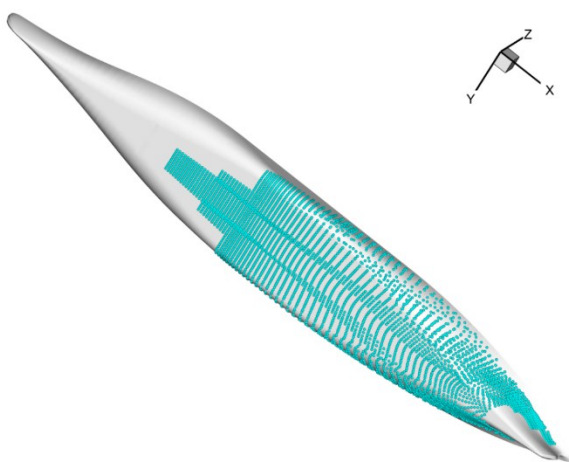


図 3.1 制御なしの気泡シミュレータの結果

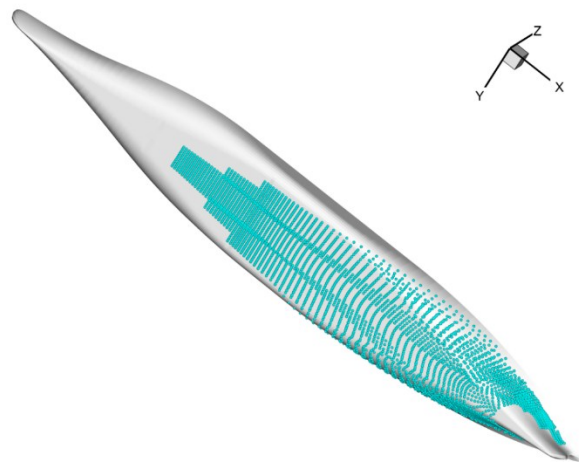


図 3.2 制御ありの気泡シミュレータの結果

4. 空気潤滑状態モニタリングシステムの基本計画

実海域での航海における空気潤滑による省エネ効果を正確に評価するための空気潤滑モニタリングシステムの仕様を検討した。

まず実運航時の空気潤滑システムの省エネ効果を解析し評価する手法を検討した。そしてその解析と評価に必要な取得すべきデータを抽出した。

そして3章で検討した空気潤滑制御システムの制御に必要なデータと、本章で検討した空気潤滑状態に省エネ効果を正確に評価するために必要なデータを取得するための搭載機器を検討し空気潤滑モニタリングシステムの仕様とした。

4.1 モニタリングデータの解析方法

4.1.1 解析手法について

実運航時の空気潤滑システムの省エネ効果を評価するためには、空気潤滑効果以外で船舶の馬力に影響を与える要素をノイズとして取り除く必要がある。船体の状態、潮流や波浪の影響による対水船速の変化、波浪や風による抵抗の変化などは、船舶の推進のために必要な馬力を大きく変化させ、空気潤滑による真の馬力低減効果を不明瞭にする。そこでモニタリングデータの解析においては、これらの影響を極力取り除くことができる手法を用いる。

空気潤滑モニタリングシステムの開発のため、実海域における省エネ効果を適切に評価できるモニタリングデータの解析方法の検討を行った。

モニタリングデータに基づく実運航時の空気潤滑法による馬力削減効果の評価は、遭遇海象下での空気潤滑非稼働時の馬力を算定し、これを空気潤滑稼働中のモニタリングデータと比較することにより行う。

遭遇海象下での空気潤滑未稼働時の馬力曲線の算定には海上技術安全研究所が開発した実運航性能シミュレータ VESTA¹⁷⁾を用いる。VESTA 計算フローチャートを図 4.1 に示す。VESTA により船型データと、波浪・風況データから、波・風による抵抗増加を算定し、実海域における全抵抗を求めることができる。さらにプロペラ性能、自航要素を用いて船体に対する外力に関する平衡式を解き、その波・風状況における馬力曲線つまり実海域馬力曲線を求めることができる。求めた実海域馬力曲線を用いて、空気潤滑時未稼働時の馬力と燃費を求める。

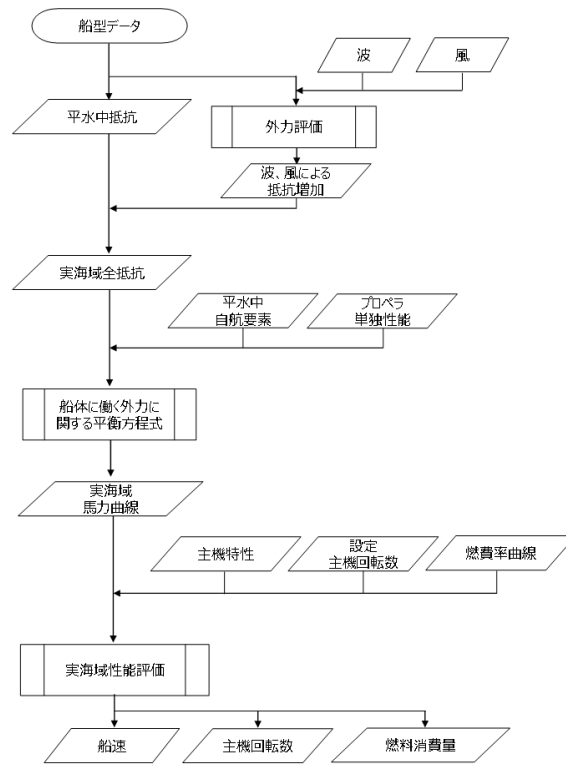


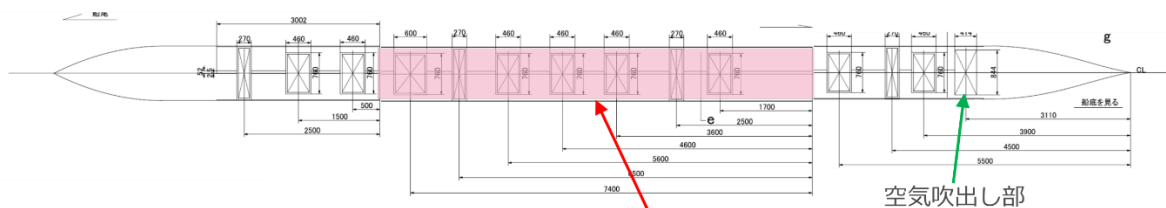
図 4.1 VESTA 計算フローチャート

VSETA により算定された空気潤滑未稼働時の馬力・燃費とモニタリングシステムで取得したデータから算定された馬力・燃費を比較して実運航時の空気潤滑システムの省エネ効果をする。

4.1.2 船体汚損による船体表面粗度が空気潤滑効果に与える影響

空気潤滑状態モニタリングシステムは、運航中の空気潤滑システム搭載船から得られる気象・海象条件、船体運動・状態等のモニタリングデータの解析を行い、気象・海象条件、船体運動・状態等が原因となるデータ上のノイズをスクリーニングすることで、空気潤滑システムによる省エネ効果を適切に評価できるようにすることを目的にしている。一方、生物付着などの汚損による影響と経年劣化による表面粗度の増加が空気潤滑の効果に与える影響は十分明らかになっていない。そこで、実海域における省エネ効果の評価を適切に行うためには、生物付着などによる船底の汚損や経年劣化による表面粗度の増加が、空気潤滑の抵抗低減効果に与える影響を調査する必要があるため、全長 20.6m の長尺平板模型船の 1 区画（長さ 8m）の船底に形状パラメータの管理された粗度を施工した平板を取り付けた状態で、空気潤滑状態の水槽試験を行った。

長尺平板模型船の概要図を図 4.2 に、主要目を表 4.1 に示す。



長尺平板模型船の1区画（長さ8m）の船底に粗度平板を取り付け

図 4.2 長尺平板模型船概要図

表 4.1 長尺平板模型船の主要目

全長 [m]	20.600
船幅 [m]	1.000
喫水 [m]	0.076
排水容積 [m ³]	1.424
浸水表面積 [m ²]	25.390
付加物	乱流促進装置、センターキール、端板

長尺平板長尺平板模型試験では、船底汚損や表面粗度の増加による空気潤滑効果へ与える影響を調査するため、3種類の粗度平板を用いて計測を実施した。なお、基準として滑面平板を用いた計測を行い、計4条件の試験を行った。

粗度平板に形成する粗度は、実船を実運航した際、船底に起きる生物等による汚損を模擬することとし、フジツボ状物体の付着による影響を調査することとした。また粗度の空気潤滑による抵抗低減効果への影響を調査するに当たり、試験結果をモニタリングデータの解析に使用するため、フジツボの形状を模した幾何学的形状の粗度とすることとした。水槽試験に使用した粗度平板模型の要目を表 4.2 に、粗度模型の模式図を図 4.3 に示す。

表 4.2 水槽試験に使用した粗度平板模型の要目

	粗度形状		粗度間隔(mm)	
	高さ(mm)	直径(mm)	前後	左右
粗度①平板模型	1.25	2.5	10	10
粗度②平板模型	2.5	5	20	20
粗度③平板模型	5	10	40	40

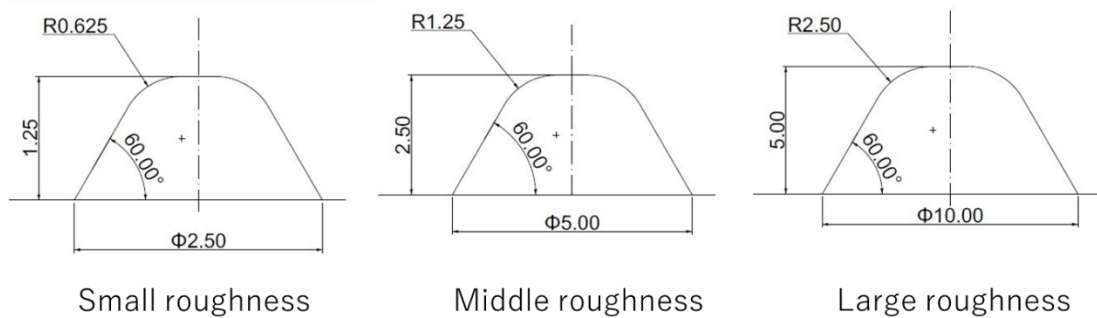


図 4.3 粗度模型模式図

空気潤滑による抵抗低減量を気泡被覆部の滑面における摩擦抵抗で除して、抵抗低減率を求めた。曳航速度 5m/s における空気吹出量と抵抗低減率の関係を図 4.4 に示す。

滑面では空気吹出量の増加にほぼ比例して抵抗低減率が增大し、抵抗低減率が 100% 近くになると飽和する。

粗度面では、全体的な傾向は滑面と同じであるが、滑面以上の抵抗低減率となる。滑面の摩擦抵抗を基準としているため、最終的には、100%以上の抵抗低減率で飽和するが、空気潤滑の無い状態での抵抗が元々大きいためであり、滑面の抵抗低減率が飽和した状態と同様の摩擦抵抗値となって飽和し

ていると考えられる。

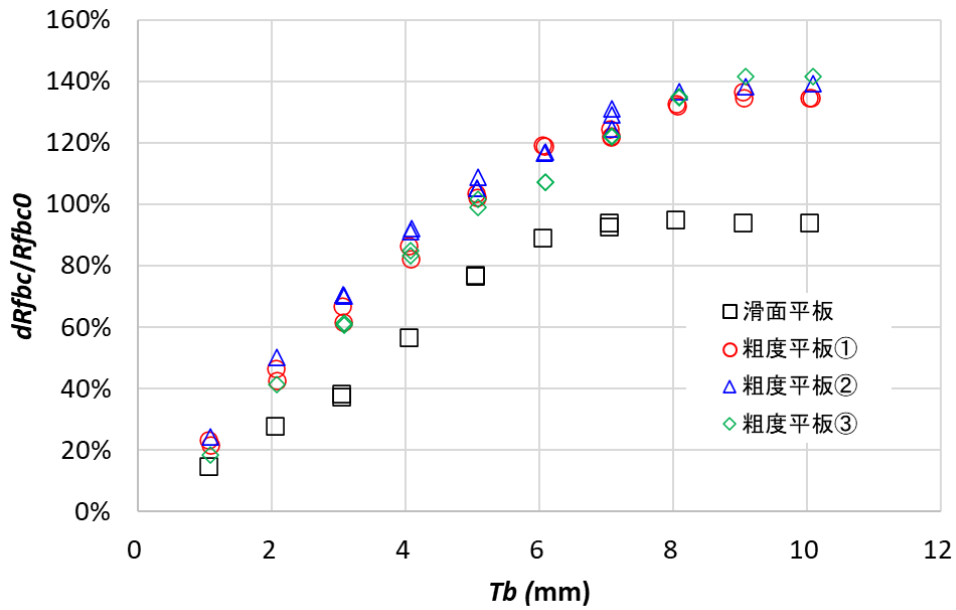


図 4.4 空気吹き出し量と抵抗低減率（滑面摩擦抵抗値を基準）の関係（5m/s）

船底に粗度板を取り付けると、平滑面よりも抵抗は増大し、粗度が大きくなるにつれて抵抗は増大した。一方、船底に粗度が有る場合、いずれの粗度の場合においても空気潤滑による抵抗低減効果が、平滑面に対して大きくなり、空気量が少ない間は、粗度面の抵抗の方が大きい、空気量を増していくと、空気潤滑状態における摩擦抵抗が、平滑面と変わらない状態となった。

これらの結果から、実運航時に、船底が汚損し、粗度が増加しても、空気潤滑作動時には、非稼働時に対して、それによる馬力増加が小さくなる場合があることが判った。

4.2 実船用空気潤滑状態モニタリングシステムの基本計画

実海域における空気潤滑による省エネ効果を推定するためには、空気潤滑時の馬力・燃費を算定するために必要なデータと VESTA を用いた実海域馬力曲線を算定するのに必要なデータがある。取得する必要なモニタリングデータを表 4.3 に示す。風、波、本船座標（波浪推算データを利用する場合）、対水船速、船首方位、針路、舵角、喫水は、VESTA で実海域馬力曲線を算定に必要なデータである。軸馬力、主機回転数、燃料消費量は、空気潤滑時の馬力・燃費を算定するためのデータ、ブローア空気量、ブローア回転数は、ブローア馬力を算定するためのデータである。

表 4.3 実船用モニタリングシステムの搭載機器と取得データ

	機器	データ
船首区画	空気温度センサ	空気温度
	圧力センサ	圧力
	空気流量センサ	空気流量
	インバータ盤	インバータ状態
	インバータ盤	ブロワー馬力
	インバータ盤	ブロワー回転数
	流量調整弁	弁開度
操舵室	加速度計	ピッチ/ロール
	対水船速計	対水船速
	船尾喫水系	船尾喫水
	船首喫水計	船首喫水
	ジャイロ	船首方位
	風向・風速計	風向/風速
	海水温度計	海水温度
	操舵システム	舵角
機関監視室	軸馬力スラスト計演算器	馬力/スラスト/トルク/回転数 燃料消費量
機関室	軸馬力スラスト計	軸馬力/スラスト

実運航時の空気潤滑による省エネ効果を評価するため、実船搭載用の空気潤滑状態モニタリングシステムの構成を計画した。2024年12月に竣工した499GT貨物船「ちゅらさん」に空気潤滑システムと空気潤滑制御システム及び空気潤滑状態モニタリングシステムを搭載することとなったため、本船に搭載するシステムとして具体的に検討し、実船用空気潤滑状態モニタリングシステムとして基本計画を行った。本モニタリングシステムの構成は、空気潤滑制御システムの制御に必要なデータと、空気潤滑状態に省エネ効果を正確に評価するために必要なデータを取得できるように取得データと搭載機器の選定を行った。実船用空気潤滑状態モニタリングシステムの構成を図4.5に示す。

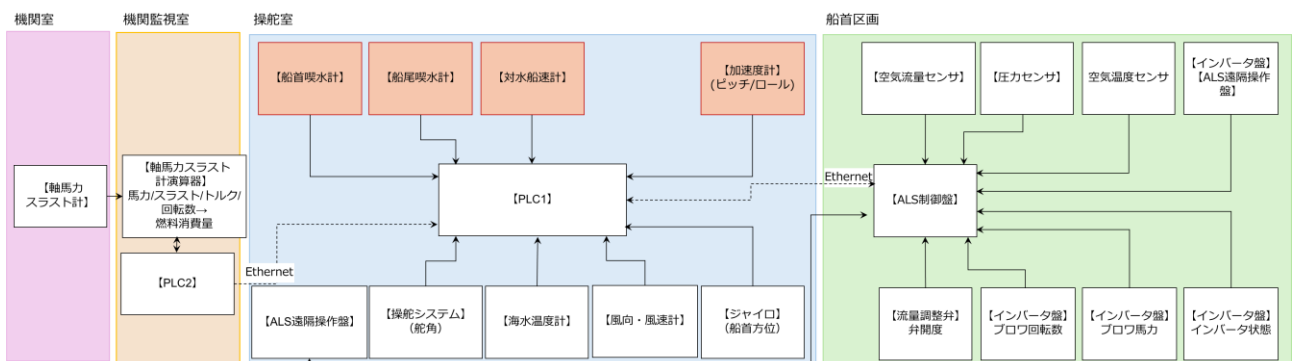


図 4.5 実船用モニタリングシステム構成図

5. 結論

内航船用標準型空気潤滑システムの検討のため、4,999DWT型タンカーを対象として、空気潤滑システム設計のための空気吹き出し部配置の計画方法の検討を行った。これまでCFDにより空気潤滑状態の抵抗計算を行うと、抵抗低減効果が過大となり、省エネ効果も過大に評価されるという問題があった。そこで、空気潤滑状態の抵抗計算だけでなく、自航計算も行い、実船実験の結果との対応がとれている長尺平板模型の水槽試験から推定した省エネ効果と、CFDによる空気潤滑状態における自航計算から推定した省エネ効果を比較し、良く一致することを確認した。

空気潤滑制御システムの開発のため、運航中の船体の状態、海象条件、船体運動の状況に合わせた空気吹出制御を行うための制御アルゴリズムの検討を行った。まず空気潤滑システムを制御した方が望ましいと考えられる状況を抽出し、それに対応した制御シナリオとアルゴリズムの検討を行った。そして制御アルゴリズムの良否を判断するための気泡挙動シミュレータの開発を行った。

空気潤滑状態モニタリングシステムの開発のため、空気潤滑モニタリングシステムに必要な構成要素と基本仕様を検討した。運航中の空気潤滑システム搭載船から得られる気象・海象条件、船体運動・状態等のモニタリングデータの解析方法の開発のため、過去の試運転データなどを参考にして、気象・海象条件、船体運動・状態等が原因となるデータをスクリーニングすることで、モニタリングデータの解析方法と、実海域における省エネ効果を適切に評価できる手法の検討を行った。その結果を踏まえて、2024年12月に竣工した499GT型貨物船に搭載する空気潤滑システムを対象に、実船用空気潤滑状態モニタリングシステムの基本設計を行った。

6. 知的財産権取得状況

特許出願 1件

・川島英幹、濱田達也、若生大輔、新川大治朗、船底の表面粗度を考慮した空気潤滑装置の制御プログラム、空気潤滑装置、及び空気潤滑システム摩擦抵抗低減装置を制御するプログラム、
出願予定)

7. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 3件、国際 1件

[1] 新川大治朗, 川島英幹, 白石耕一郎, 粉原直人: 空気潤滑システムの吹出パターンが推進性能に与える影響—4,990DWTタンカーにおける数値シミュレーション—, 日本船舶海洋工学会講演会, 2024.5, (Kanazawa, Japan), (掲載済み)

[2] 新川大治朗, 川島英幹, 白石耕一郎: 内航船における空気潤滑システムの横傾斜および斜航時の数値計算, 日本船舶海洋工学会講演会, 2024.11, (Yokohama, Japan), (掲載済み)

[3] 川島英幹, 濱田達也, 若生大輔, 新川大治朗, 藤井啓太: 船底の表面粗度が空気潤滑の抵抗低減効果に与える影響について, 2024.11, (Yokohama, Japan), (掲載済み)

[4] Daijiro Arakawa, Koichiro Shiraishi, Yasutaka Kawanami, Hideki Kawashima: Propeller design for air lubrication ship considering the change of wake, Proceedings of the 13th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 2025.8, (Fukuoka, Japan), (掲載済み)

[5] Hideki Kawashima, Daijiro Arakawa, Koichiro Shiraishi, Tatsuya Hamada, Takamichi

Hiroi, Research on improving the practical energy-saving effects of air lubrication systems by constructing an IoT-based energy-saving effect monitoring system in actual sea areas, Proceedings of EcoDesign 2025 International Symposium, 2025.11, (Tokyo, Japan), (投稿済み)

2) 口頭発表

国内 4件、国際 2件

[1] 新川大治朗, 川島英幹, 白石耕一郎, 粉原直人: 空気潤滑システムの吹出パターンが推進性能に与える影響—4,990DWT タンカーにおける数値シミュレーション—, 日本船舶海洋工学会講演会, 2024.5, (Kanazawa, Japan), (発表済み、講演論文投稿済み)

[2] Daijiro Arakawa, Hideki Kawashima, Hamada Tatsuya, Koichiro Shiraishi: Numerical study on the mechanism of bubble-propeller interaction in air-lubrication ship, 20th International Workshop on Trends in Numerical and Physical Modelling for Industrial Multiphase Flows, 2024.9, (Duisburg, Germany) (発表済み)

[3] 新川大治朗, 川島英幹, 白石耕一郎: 内航船における空気潤滑システムの横傾斜および斜航時の数値計算, 日本船舶海洋工学会講演会, 2024.11, (Yokohama, Japan), (発表済み)

[4] 川島英幹, 濱田達也, 若生大輔, 新川大治朗, 藤井啓太: 船底の表面粗度が空気潤滑の抵抗低減効果に与える影響について, 2024.11, (Yokohama, Japan), (発表済み)

[5] 新川大治朗: 泡の力で船を省エネ化—抵抗低減技術の開発と最前線—, うみコン (海と産業革新コンベンション) 3国研シンポジウム, 2024,12, (Yokohama, Japan), (発表済み)

[6] Daijiro Arakawa, Koichiro Shiraishi, Yasutaka Kawanami, Hideki Kawashima: Propeller design for air lubrication ship considering the change of wake, Proceedings of the 13th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 2025.8, (Fukuoka, Japan), (発表済)

[7] Hideki Kawashima, Daijiro Arakawa, Koichiro Shiraishi, Tatsuya Hamada, Takamichi Hiroi, Research on improving the practical energy-saving effects of air lubrication systems by constructing an IoT-based energy-saving effect monitoring system in actual sea areas, Proceedings of EcoDesign 2025 International Symposium, 2025.11, (Tokyo, Japan), (発表予定)

3) その他 (研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等)

プレス発表等:

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所: 船体空気潤滑システムの開発を開始, 2022.3.10, <https://www.nmri.go.jp/news/press/2022/press20220310.html>

ナカシマプロペラ: 船体空気潤滑システムの開発を開始, 2022.3.10, <https://propelling.jp/jp/news/page/?id=14>

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所: 泡の力で船の抵抗を減らす!!

「長尺平板模型船を用いた空気潤滑実験」公開実験, 2023.6.9, <https://www.nmri.go.jp/news/press/2023/press20230609.html>

8. 参考文献

- 1) 日夏宗彦, 児玉良明, 堀利文, 川島英幹, 竹子春弥, 牧野雅彦, 大縄将史, 眞田有吾, 村井祐一, 太田翔子: 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験 (準備), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号, 2008, pp. 161-162.
- 2) 児玉良明, 日夏宗彦, 堀利文, 川島英幹, 竹子春弥, 牧野雅彦, 大縄将史, 眞田有吾, 村井祐一, 太田翔子: 大型セメント運搬船を用いた空気潤滑法による省エネ実船実験 (結果と解析), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号, 2008, pp. 163-166.
- 3) 川北千春, 高野真一, 小段洋一郎, 溝上宗二: 空気潤滑システム搭載船の実船船底気泡流と摩擦抵抗低減効果, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, 2011, pp.429-432.
- 4) 溝尻貴明, 藤田均, 小山博道, 田井祥史, 井上久嗣, 日夏宗彦, 岸本雅裕, 堀利文: 28,000DWT ばら積み運搬船への空気潤滑法の適用, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 12 号, 2011, pp.425-428.
- 5) 川島英幹, 日夏宗彦, 堀利文, 牧野雅彦, 竹子春弥: 空気潤滑法における抵抗低減効果の速度影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 9E 号, 2009, pp. 93-95.
- 6) 川島英幹, 日夏宗彦, 堀利文, 牧野雅彦, 竹子春弥: 空気潤滑における速度とボイド率の抵抗低減効果への影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, 2020, pp. 527-534.
- 7) 鈴木和夫, 佐々木紀幸, 川村隆文: 船舶海洋工学シリーズ②船体抵抗と推進, 日本船舶海洋工学会, 青山堂, 2012.
- 8) Kawamura, T. and Yoshida, H: Numerical Modeling of Bubble Distribution in Horizontal Bubbly Channel Flow, 5th International Conference on Multiphase Flow, Paper No.4, pp.1-10. 2004
- 9) Murakami, A., Kawamura, T. and Hinatsu, M.: Numerical Simulation of Microbubble Drag Reduction of a Full Scale Ship, Proceedings of 3rd PAAMES and AMEC2008, pp.83-88. 2008.
- 10) 川島久宜, 牧野雅彦, 堀利文, 日夏宗彦, 児玉良明: 50m 平板を用いた 2 段吹き出しによるマイクロバブル抵抗低減実験, 日本船舶海洋工学会春季講演会論文集, 第 2E 号, 2006, pp. 147-150.
- 11) 川島英幹, 川島久宜, 堀利文, 牧野雅彦, 迫田我行, 大縄将史, 日夏宗彦, 児玉良明 他: 長尺平板模型を用いた気泡吹き出し法による抵抗低減実験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集, 第 3 号, 2006, pp. 285-288.
- 12) Kawashima H. Kodama Y., Hinatsu M., Hori T., Makino M., Ohnawa M., Takeshi H., Sakoda M., Kawashima H., Matsuno F.: A RESEARCH PROJECT ON APPLICATION OF AIR BUBBLE INJECTION, Proceedings of FEDSM2007, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, California USA, July 30-August 2, 2007.
- 13) 川島英幹, 日夏宗彦, 児玉良明, 竹子春弥, 堀利文, 牧野雅彦, 大縄将史, 川島久宜, 迫田我行, 松野史子: 船舶の省エネルギーデバイスとしての空気吹き出し法の有効性について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 4 号, 2007, pp. 79-82.
- 14) 牧野雅彦, 児玉良明, 堀利文, 日夏宗彦, 竹子春弥, 川島英幹, 大縄将史: 22m 長尺平板を用いた空気潤滑法による摩擦抵抗低減効果の速度依存性実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 5E 号, 2007, pp. 79-82.
- 15) 濱田達也, 若生大輔, 川北千春: 20m 長尺模型を用いた空気潤滑法によるボイド率分布と局所摩擦抵抗の低減に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, 2020.

- 16) Larrate, F. and Kodama, Y. : Trajectory of bubbles under a ship hull and scale effects, Proceedings of The Kansai Society of Naval Architects, November 1996.
- 17) Tsujimoto, M. and Sogihara, N. and Kuroda, M. and Sakurada, A.: DEVELOPMENT OF A SHIP PERFORMANCE SIMULATOR IN ACTUAL SEAS, OMAE2015.
- 18) Kameyama, M., Kojima, S., Imai, S., Ueda, K., Kiriya, K. and Sugawara, S.: 船体防汚塗料による生物付着防止効果の計測手法に関する研究, 海上技術安全研究所, 第 12 巻, 第 1 号, 平成 24 年.
- 19) Dogancan Uzun, Yansheng Zhang, Yigit Kemal Demirel, and Osman Turan : EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ADDED RESISTANCE OF BARNACLE FOULING ON SHIPS BY USING 3D PRINTED BARNACLES.
- 20) Arakawa D. et.al. : Numerical study on the influence of air bubbles around the ship hull on the propulsive efficiency, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.38, pp.1-15, 2023.
- 21) Kawamura T., et al. : A Research Project on Application of Air Bubble Injection to a Full Scale Ship for Drag Reduction, Proceedings of FEDSM2007, 2007.
- 22) 村上麻子, 川村隆文 : 気泡吹き出しによる抵抗低減の予測のための新しい数値モデル, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 8 号, pp.267-270, 2009.
- 23) 山崎隆介 : 簡易プロペラ理論について, 西部造船会々報, 第 95 号, pp.251-271, 1998.
- 24) 川島久宜, 日夏宗彦, 児玉良明, 堀利文, 迫田我行, 牧野雅彦 : 気泡流中におけるプロペラ単独特性 第 1 報 : 気泡吹き出しによる局所ボイド率分布と速度分布計測, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 9 号, pp.63-70, 2009.
- 25) 日夏宗彦, 川島久宜, 児玉良明, 堀利文, 迫田我行, 牧野雅彦 : 気泡流中におけるプロペラ単独特性 第 2 報 : 気泡流中におけるプロペラ性能試験結果, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 9 号, pp.71-78, 2009.
- 26) 独立行政法人 海上技術安全研究所 : 「次世代内航船の研究開発」平成 14 年度成果報告書, 2003.
- 27) 経済産業省 資源エネルギー庁 : 令和 5 年度「AI・IoT 等を活用した更なる輸送効率化推進事業費補助金（内航船の革新的運航効率化実証事業）」に係る補助事業者の 3 次公募の結果について, https://www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer_result/2023/1106_02.html, 2023.11.6.
- 28) 国土交通省 : 省エネ内航船の船型開発及び建造・実証を支援します～公募結果のお知らせ～, https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000295.html, 2023.11.6.
- 29) 一般社団法人 内航ミライ研究会 : 「SIM-SHIP1 mk2」建造発表 -革新技術で海運業界の未来へ舵を切る-, <https://www.7151000.jp/post/%E3%80%8Csim-ship1-mk2%E3%80%8D%E5%BB%BA%E9%80%A0%E7%99%BA%E8%A1%A8-%E9%9D%A9%E6%96%B0%E6%8A%80%E8%A1%93%E3%81%A7%E6%B5%B7%E9%81%8B%E6%A5%AD%E7%95%8C%E3%81%AE%E6%9C%AA%E6%9D%A5%E3%81%B8%E8%88%B5%E3%82%92%E5%88%87%E3%82%8B>, 2024.1.11.